

深空探测人工智能技术与展望

于登云¹, 张哲², 泮斌峰³, 刘传凯⁴, 丁亮⁵, 朱继宏³, 高海波⁵, 刘金国⁶, 陈鹏⁷

(1. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048; 2. 探月与航天工程中心, 北京 100190; 3. 西北工业大学 航天学院, 西安 710072;
4. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094; 5. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001;
6. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 沈阳 110016; 7. 上海航天技术研究院北京研发中心, 北京 100081)

摘要: 面对深空探测远距离、极端环境等带来的一系列挑战, 人工智能技术将成为以月球/行星驻留科学探测与资源开发利用为主体的未来深空探测任务的研究重点。在总结分析深空探测人工智能技术发展历程与态势的基础上, 分析了深空探测人工智能技术的主要特点, 并提出了需重点发展的关键技术。

关键词: 深空探测; 驻留与资源开发; 人工智能; 机器人

中图分类号: V467.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2020)01-0011-13

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20190916001

引用格式: 于登云, 张哲, 泮斌峰, 等. 深空探测人工智能技术与展望[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 11-23.

Reference format: YU D Y, ZHANG Z, PAN B F, et al. Development and trend of artificial intelligent in deep space exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(1): 11-23.

引言

深空探测是指对月球及以远天体或空间环境开展的探测^[1]和资源开发利用活动。我国探月任务的连续成功和国外深空探测计划的持续推进, 将人类深空探测活动推向新的高潮, 深空探测已成为世界各主要航天国家竞相发展的新热点^[1-5]。深空探测任务面临探测环境复杂且不确定、距离远且飞行时间长、通信延迟大且数传速率低、信息不完备天地互动决策难、多器协同控制与信息融合难等一系列关键难题, 亟需技术创新和技术突破。

近年来, 以机器学习为代表的人工智能技术得到了极其快速的发展, 并在计算机视觉、语音识别、机器人等领域获得了日益广泛的成功应用^[6], 为构建新的航天器操控模式、发展智能化深空探测体系等提供了良好支撑。同时, 后续深空探测任务主要以对月球及更深更远更广阔空间的探测和资源开发利用为主体, 对人工智能技术也提出了更高更迫切的需求。如我国“嫦娥4号”任务中的巡视器, 采用了传统的地面测控站+航天器的大回路操作控制模式, 并通过“鹊桥”中继星实现与地球的通信及遥操作控制^[3]。由于受地-月中继通信延时较高及月面环境复杂等因素的影响, 这种

依赖于地面设计与规划的遥操作控制方式工作效率较低, 如果应用人工智能技术, 依赖巡视器所配置的视觉相机和器载计算机实现巡视器自主、智能的月球/行星地形感知、导航定位、路径规划与避障^[7-8], 将进一步提升其探测和表面作业能力。

目前深空探测人工智能技术的研究与应用尚处于发展初期。面对深空探测远距离、极端环境等带来的一系列挑战, 人工智能技术将成为以月球/行星驻留科学探测与资源开发利用为主体的未来深空探测任务的研究重点。本文在总结分析深空探测人工智能技术发展历程与态势的基础上, 分析了深空探测人工智能技术的主要特点, 并提出了需重点发展的关键技术。

1 深空探测人工智能技术发展历程与趋势

深空探测技术发展至今, 根据探测器的操控模式可分为手动、自动化、自主化和智能化4个阶段, 分别为:

- 1) 手动, 依赖于地面操控人员或载人航天任务中航天员手动操作;
- 2) 自动化, 依赖于地面预设的程序和流程严格执行预定任务;
- 3) 自主化, 针对模型和环境确定性问题的, 基于数学方法设计系统使其具备可摆脱外界影响做出自主选

择的能力，主要执行信息基本完全、环境基本确定、低动态的相对简单任务；

4) 智能化，针对模型和环境不确定性问题，基于人工智能技术使系统具备与人类相似的能力，能够执行信息不完全、环境不确定、高动态的复杂任务。

截至目前，人类的深空探测活动基本以短期和单一任务为主，主要依赖手动、自动和少量自主化的混合方式。如“阿波罗”（Apollo）登月舱的月面着陆过程，动力下降段采用的是自主制导和自动控制相结合的方式，其末着陆段则采用航天员手动操控方式；美国的“好奇号”（Curiosity）火星车以及我国的“玉兔号”“玉兔2号”月球车（即巡视器）在火星/月球表面巡视时也主要采取地面手动遥操作方式。因此，目前深空探测尚处于从自动化向信息化、自主化发展的阶段，智能化的研究和应用更为初步。

随着人类深空探测技术的发展，后续深空探测不仅任务种类多、协调要求高、执行难度大，而且涉及月球/行星的表面、空中、地下等多个任务执行环境，对现有自动化、自主化技术构成了严峻挑战。随着人工智能技术的快速发展，将其应用于深空探测任务以解决上述技术难题的时机日趋成熟，发展深空探测人工智能技术迫在眉睫^[9]。

1.1 人工智能的基本内涵

人工智能是一个很宽泛的概念，目前未见完整权威的定义，大体来说就是借助计算机和某些感知与执行单元完成某些与人的智能有关的复杂功能的能力。它是一个多学科交叉的研究领域，涉及的技术门类众多，所发展的方法也多种多样，一般来说可归纳为以下5个方面^[6,9-12]。

1) 专家系统

专家系统也称为基于知识的系统，其设计目的是使机器能像人类专家那样求解专门领域中复杂的非数值问题，体现了人工智能的推理能力。

2) 计算机视觉

计算机视觉使机器能像人类一样从视觉图像中得出有意义的信息，包括模式识别、图像处理等，体现了人工智能的感知能力。

3) 自然语言理解与交流

自然语言理解与交流使机器能够使用人类所熟悉的语言来改进人类和计算机之间的通信，包括语音识别、合成、对话等，体现了人工智能的语言能力。

4) 机器人学

机器人学包括结构、控制、感知、规划、交互等，体现了人工智能的规划与操控能力。

5) 机器学习

机器学习是指计算机利用已有的数据（经验），得出某种模型（规律），并利用此模型预测未来数据特征的一种方法，体现了人工智能的学习能力。

人工智能按其智能化程度可分为以下3个层次^[6,9-12]：

1) 弱人工智能，能够模拟人脑的基本功能，如感知、记忆、学习和决策；

2) 强人工智能，能够进行思考、计划、解决问题、抽象思维、理解复杂理念、快速学习和从经验中学习等操作；

3) 超级人工智能，能够在几乎所有领域超过人类，包括科学创新、通识和社交技能等。

目前国内外在人工智能领域，特别是航天领域对人工智能的研究与应用方面，基本以弱人工智能为主，并以强人工智能作为长期目标。

1.2 发展历程

人工智能技术在深空探测领域的研究与应用最早可追溯至20世纪60年代，迄今已有50多年的历史，其发展历程曲折起伏，大致分为以下3个阶段：

1) 第1阶段：20世纪60年代初—80年代末。20世纪60年代出现的专家系统能够模拟人类专家的知识和经验来解决特定领域的问题，实现了人工智能从理论研究走向实际应用的重大突破。在这一背景下，专家系统在深空探测领域也得到了飞速发展和广泛应用，如在美国“阿波罗”任务期间所发展的“土星”运载火箭中便已应用了专家系统，其主要作用是在运载火箭出现故障情况下，帮助系统工程师进行故障诊断和判别^[13]。

2) 第2阶段：20世纪90年代初—2010年。随着人工智能的应用规模不断扩大，专家系统存在的推理方法单一、只适用于简单问题的初步智能决策等“不能用、不好用”的缺点逐渐暴露出来，专家系统在深空探测领域的应用转入低迷期。在这一时期，机器人技术得到了快速发展，在以月球和火星为主的深空探测领域也得到越来越多的应用，其中：

(1) 1997年7月，美国的“火星探路者”（Mars Pathfinder）任务^[14]成功实施，“索杰纳号”（Sojourner）火星车成为第一辆在火星上进行科学考察的火星星表巡视器。它既可以通过自身携带的惯性测量单元进行自主导航，也可通过着陆器上的双目相机进行近距离的视觉辅助导航，以校正航位推算法带来的误差。它向地球传回了超过1万张照片和大量科学数据，验证了利用自主移动机器人进行火星探测的可行性，并在全球范围内掀起了基于机器人的行星探测热潮。

(2) 2003年, 美国提出“火星探测漫游者”(Mars Exploration Rover, MER) 计划^[15], 并在2004年将“勇气号”(Courage) 和“机遇号”(Opportunity) 火星车送上了火星。“火星探测漫游者”利用视觉和惯性结合进行定位, 通过组合导航方式消除车轮打滑造成的误差, 还运用了里程计、光束平差法、地面与卫星影像对比、无线电定位、天文导航等多种定位方法, 保证了导航信息的准确性与实时性。美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL) 为“勇气号”和“机遇号”开发了基于立体图像生成的数字高程图, 用于评估危险地形, 并通过训练人工神经网络分类器^[16]实现地形分类, 进而识别障碍分布情况; 同时, 采用车辆任务序列与可视化系统^[17], 为工程师提供人机接口, 辅助任务序列制定, 支持科学家和工程师将人类智能有效地整合到行星探索任务中。正是借助人工智能技术, “勇气号”和“机遇号”高质量地完成了探测任务, 取得诸多科学发现^[18-19]。

(3) 此外, 来自田纳西州立大学(Tennessee State University)、加利福尼亚理工大学(California Institute of Technology)、喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory) 和麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology) 等多家科研机构的研究人员, 还在自主地形分类^[20]、自主地形打滑预测^[21]、地形特性自主学习^[22]和多特征地形优度地图构建方面取得了突出的研究进展, 提高了地形可通过性判断、路径规划和路径跟踪补偿的智能性。其中, 喷气推进实验室的Thompson等提出了一种可以机载运行的地形分类方法^[23], 并用于预测土壤成分, 其对应的纹理特征^[24]被用于火星车机载智能相机TextureCam的开发^[25-26]。

3) 第3阶段: 2011年至今。随着大数据、云计算、深度学习的兴起, 人工智能技术实现了从“不能用、不好用”到“能用、好用”的技术突破, 迎来爆发式增长的新高潮。人工智能技术也被更广阔地应用到深空探测领域的多个方面, 其中典型研究和应用有:

(1) 专家系统方面。2012年, 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提出一种基于学习策略的专家系统, 使用领域专家知识模型对深空探测任务所获得的大量数据进行在轨处理, 从中筛选科学价值较高的数据传回地面, 以提高深空探测任务的科学回报^[8, 27]。2014年9月—2015年10月, NASA和欧洲航天局(European Space Agency, ESA) 合作将专家系统技术应用于“罗塞塔号”(Rosetta) 探测器的任务调度, 成功解决了其所携带的11个科学仪器极其复杂的探测任务规划问题^[28]。

(2) 计算机视觉方面。2016年5月, NASA在“好奇号”火星车上成功验证了AEGIS (Autonomous Exploration for Gathering Increased Science) 人工智能系统, 该系统具有智能选取岩石并调度激光器射击岩石进行成分分析的能力^[29]。

(3) 自然语言理解与交流方面。2018年6月, 美国太空探索公司(SpaceX) 的“猎鹰9号”(Falcon 9) 火箭将首个基于人工智能的宇航员机器人助手CIMON (宇航员交互移动伴侣) 送入国际空间站进行功能验证。CIMON由空中客车公司(Airbus)、IBM和德国宇航院(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.v., DLR) 等机构联合开发, 拥有人工智能大脑和8英寸大的显示屏, 可为宇航员提供技术帮助、系统故障和危险警示以及一系列娱乐功能, 虽然目前的研究尚停留在近地轨道技术验证阶段, 但有望在未来深空探测任务中发挥重要作用。

(4) 机器人学方面。2017年至今, NASA开展了基于人工智能技术的月球探测多机器人智能协调、规划、调度和控制技术研究, 使机器人在无法与月表探测器保持持续通信情况下进入更深的月坑实现科学探测。此外, 2011年美国成功发射了第一辆采用核动力驱动的“好奇号”火星车^[29]; 2013年和2019年, 中国的“玉兔号”^[30]和“玉兔2号”月球车分别在月球正面和背面成功着陆, 代表了月球/行星探测机器人技术的重要进展。在“好奇号”火星车中, 喷气推进实验室为其开发了一套基于风险识别的地形远程评估工具^[31]和基于深度学习技术的视觉地形分类技术^[32], 能够对地形的危险程度和特征进行智能评估。

(5) 机器学习方面。美国亚利桑那大学(University of Arizona)、麻省理工学院及欧洲航天局等^[33-45]广泛探讨了基于深度学习、强化学习及深度强化学习的月球/行星软着陆及其智能巡航等问题。近年来, 中国多所高校和研究机构^[46-49]也陆续开展了相关研究。

尽管在深空探测领域对人工智能技术的研究和应用已逾50年, 但目前仍然处于较为初级的阶段, 大部分深空探测活动中人工智能技术的智能程度较低, 甚至许多应用仅是自动化与信息化结合实现部分自主化, 未达到真正的智能化。

1.3 发展趋势

可以预见, 人工智能有可能彻底改变空间探索格局, 特别是对以月球/行星驻留科学探测与资源开发利用为主体的后续深空探测任务, 将带来变革性影响, 呈现深度融合、自主学习、脑机协同、群智开放等新特征:

1) 从人工智能的应用转向人工智能与其它学科领域的深度交叉融合

深空探测是一项复杂的系统工程, 涉及计算机科学、数学、力学、机械学、认知科学、建筑学、医学、生物学、神经科学和管理科学等众多基础和前沿学科。未来的深空探测人工智能技术必然是人工智能与上述多学科深度融合后的更高层次的集成技术, 如月球/行星表面建筑智能机器人, 必将是人工智能与机械学、建筑学等高度融合的产物。

2) 从依赖人类辅导学习迈向无人自主学习

当前人工智能领域的大量研究集中在依赖人类辅导和人工干预的机器学习领域, 比如人工设定应用场景、人工采集和标注大量训练数据等, 非常费时费力。在未来的深空探测任务中, 将长期以无人探测为主, 无法依赖人类的监督、辅导实现大规模的机器学习训练。因此, 不依赖于科研人员或航天员人工干预的、具有对环境自主学习能力的的人工智能技术将成为主流。

3) 从人工智能走向脑机混合智能

未来大规模深空探测任务必然需要地面技术人员、航天员与机器人协同工作, 因此智能化技术也将从单纯的机器智能升级到脑机混合智能。机器智能在海量存储、精确计算和快速搜索等方面具有优势, 而人类智能擅长复杂环境感知、学习、情感和推理想象等, 因此脑机混合智能同时包含机器智能和人类智能, 能够综合利用两者各自的优势, 以克服单一智能

无法解决的难题^[50-51]。脑机混合智能通过脑机接口技术, 将脑电波/脑神经和机器直接连接为一个整体, 不仅能够提升人工智能系统的性能, 也能够赋予航天员更强的能力。可以预见, 随着脑机混合智能技术的快速发展, 其在深空探测后续任务中的应用将逐步扩展。

4) 从单一智能发展为集群智能

集群智能技术通过模拟群聚生物的协作行为与信息交互方式, 以自主化和智能化的整体协同方式完成任务, 具有去中心化、集群复原和功能叠加放大等优点。后续深空探测任务必然是多器协同探测、多智能体联合工作的复杂体系, 在实现单一智能体人工智能技术的基础上, 发展多智能体的人工智能技术, 将是构建智能深空探测体系的重要支撑手段。

2 深空探测后续任务主要特点

目前, 人类的深空探测活动主要以单一或两个探测器为主, 每次探测具有明确的任务目标, 通过逐渐增加自主能力和扩大探测范围提升认知经验和探测水平。中国深空探测后续任务将主要以月球/行星驻留科学探测与资源开发利用为主体, 这是探测能力提升到一定水平后对探测范围和开发能力的深度拓展, 是人类与众多智能装备协同开展的长期、复杂的大规模月球/行星表面探测活动的必然趋势。以月球探测为例, 未来月球驻留科学探测与资源开发利用类深空探测任务的建设与开发过程, 大致可以分为3个步骤(如图1所示)。



图1 长期、复杂的月球驻留科学探测与资源开发利用系统工程体系

Fig. 1 Engineering system of lunar resident scientific exploration and resources development and utilization system

第1步，建立由两个且可交联的中心节点探测器加若干智能体组成的月球科研站基本型，搭载智能化就位与巡视探测装备、初步的能源供给装置，开展更广泛的科学探测和资源开发利用技术验证，形成规模化月面数据并进行智能分析获取有效资源的分布数据。

第2步，建立由多个且可相互交联的中心节点探测器加若干智能体组成、可短期有人照料的月球科研站，搭载模块化、智能化资源开采和生命保障装置，开展短期有人照料参与、长期自主运行的深度科学研究和部分资源开发利用，初步实现不同类型资源的开采/运输和不同类型原位制造。

第3步，建立可长期有人驻留且包含多个科研与资源开发利用设施的月球基地，开展可长期有人参与、具有一定规模的科学研究和资源开发利用，对能源供给机制实现多样化来源、规模化集中、智能化分配建设，对月面资源采集、利用、建设等装备和设施实现智能化运行与管理。

与此同时，基于前期探月工程所取得的一系列技术突破，针对月球资源的开发利用和月球以外更远的深空，我国正在同步规划论证探月工程四期、小行星表面吸附采样与返回、火星表面采样返回等多项高复杂性探测任务。这些以月球/行星驻留科学探测与资源开发利用为主体的后续深空探测任务将是轨道器、着陆探测器、月球车/行星车、中继星、月球/行星资源及地面控制中心等有机结合的大型系统工程，主要具有以下八个方面的特点。

2.1 多目标复杂飞行任务将转变为探测器智能为主、地面干预为辅的新模式

目前的月球、火星探测任务中，探测器的飞行轨道、机动时刻等关键因素是由地面预先规划和注入执行的。未来的月球、火星、小行星及太阳边际探测^[52]等任务中，探测器数量、飞行轨道、测控复杂性将大大提高，而受到地面测控资源和通信带宽等因素的限制，未来多个探测器的绕月飞行及月球以外深空探测器的复杂飞行过程，难以全部依赖地面控制中心的规划，必须具备很强的自主能力；同时，地面控制中心也要对深空飞行器进行定期联络，以确定其安全性和飞行正确性，这就为探测器自主与地面干预之间的平衡提出了新的难题。针对不同类型的复杂任务、不同数量的飞行目标、不同类型的轨控策略，设计探测器自主飞行与地面适度干预的协同模式，将是未来多目标复杂飞行任务中必须攻克的瓶颈性问题，也是探测器智能与地面智能进行切分与协同的关键性问题。

2.2 精准着陆和大范围勘察是月球/行星驻留科学探测与资源开发利用的前提

后续的月球/行星探测任务，将围绕某一中心区在一定范围内开展大规模的开采与建造活动。首先探测器能够定点、高精度着陆至预选区中心位置，将机器人、物资、航天员运送至中心区，然后机器人或航天员在周围数十千米甚至数百千米开展探测与开采活动。目前的巡视器仅能以较慢的速度在月球/行星表面逐步推进探测过程。在月球/行星基地建设与资源开发阶段，轨道器或月球/行星表面航天器需进行高机动大范围勘察，分析环境、资源等因素，然后派遣月球/行星车快速机动转移至目标区开展资源开采任务，这要求月球/行星表面航天器必须与轨道器密切配合，通过航天器开展大范围勘察与局部区域精细化勘察，为机器人活动选定目标区，使机器人探测有的放矢。

不仅如此，精准着陆技术还是火星和小行星着陆采样任务的关键支撑技术，使探测器能够在火星表面定点着陆或者在小行星表面定点吸附，实现高价值采样。

2.3 星表基地建设与管理将成为月球/行星长期驻留的必然要求

星表基地是实现长期驻留科学探测与资源开发利用的基石，是航天员长时间开展科研工作的前提。为实现月球/行星资源开发与利用，各航天大国纷纷制定了以月球为主体的月球/行星基地建设计划。美国的月球基地规划首选理想地点位于月球南极附近的沙克尔顿环形山（Shackleton Crater），利用其长时间光照以及富集的氢元素储备，开展基地建造和月面资源利用活动，计划2030年前建成一个功能齐全的航天员居留地，该基地由航天员生活区、日常工作场所、月球车、科研仪器设备、电力供应和通信系统等部分组成，可以保障航天员在月球上持续居住180天，并配备加压月球车以脱掉笨重航天服在月面上驾驶行进，开展科学考察^[53-56]；俄罗斯计划2028—2032年建造一座有人居住的月球基地，2040年前建设航天员月球常驻基地^[57-59]；欧洲航天局将主要进行包括月球在内的机器人探测，2020年前后执行月球、火星和小行星等探测任务；日本计划2025—2030年进行人机联合登月，并建立月球基地^[59]。可以预见，月球/行星基地建设与管理将成为月球/行星探测计划的重点，也是月球/行星长期驻留科学探测与资源开发利用的必然要求。

2.4 原位资源开采与利用是基地建设与管理长期驻留的必然选择

原位资源利用技术是通过勘测、获取和利用地外

天体的天然资源,使人类真正走出地球迈向深空,实现永续生存必不可少的基础之一。为建设月球/行星基地,在月球/行星上进行矿产开采等活动,必须解决建筑材料问题,应当尽可能就地、就近开展各种工程建设。围绕月球/行星基地进行的人类长期居住、生产、实验以及资源开发利用,均需要月球/行星原位资源维持,相关需求主要包括基地的建造、氧气和水的制备、生活用品的加工和居住环境的维持等。NASA在其独立实施的空间探测发展计划中,将原位资源利用技术列为12项关键技术之一,并在马歇尔空间飞行中心(Marshall Flight Centre)成立了专门的研究机构,目前已挑选了10家公司研究收集、处理、使用太空资源技术,用于支持月球和火星任务。欧洲航天局投资研发或者付费使用可将月球物质原位转化为氧气和水的技术,以保障未来载人深空探测活动,并邀请外国机构参加为期一年的“原位资源利用示范任务”研究。

发展地外天体可能的水冰资源、矿物资源等原位资源利用技术,可以显著降低深空探测任务的费用和风险,例如利用月壤或月球矿物作为月球基地建设的原材料,将是实现基本部件生产和基地建造的关键。中国西北工业大学等高校和研究机构已开展了利用月壤、3D打印技术建造月球基地房屋等设施的相关研究工作。

2.5 功能各异的机器人将成为资源开采与基地建造任务的主体

未来的月球/行星资源开采和基地建造需要执行远程勘查、外出开采、原料运输、设施建造等任务,需要针对不同任务类型设计不同功能的机器人,通过多个机器人之间的协作完成任务。目前成功在地外月球/行星表面运行的机器人均采用轮式移动机构,采样机器人主要采用着陆区附近钻取或铲挖的方式,移动路线较为平坦,采样操作较为简单。在月球/行星资源开采与基地建造阶段,铲取或钻取机器人应能够大范围机动至目标区,对月球/行星表面及其以下矿产执行挖掘与开采任务,分析月球/行星不同区域的地质构造与资源可用度,月球/行星机器人种类也将大大增加,月球/行星表面作业任务将由原来的单一作业转变为多种机器人协同作业,并将根据作业类型研发勘察机器人、开采机器人、运输机器人、球形机器人、腿式机器人,甚至飞行器机器人等。不同类型的机器人将通过群体协同,支撑资源开采和建造任务的高效实施。

2.6 深空探测机器人智能化程度及学习模式亟需提升

在月球/行星表面长期驻留期间,机器人作为主体活动对象,开展资源开发利用与科学研究任务,需要具备适应非结构化环境、应对复杂多变任务的能力。

目前的探测机器人在月面或火星表面开展巡视探测和采样操作等任务,主要依靠地面遥操作规划的方式实现,探测与操作效率不高,且在星表的行为主要采用较为固定的模式或者只能进行微小调整,对新环境、新任务的适应能力不强,智能化程度较低。未来深空天体资源开采、基地与大型保障设施建造以及科学装置布设等任务需要在更加广阔的区域、更加复杂的地形表面进行,且操作类型和操作复杂度无法在地面预知,因此亟需提升机器人的智能化程度以实现其对新环境、新任务的适应性。

另外,目前地面机器人智能主要通过其在工作环境进行大量针对性学习训练实现。由于深空环境的特殊性,深空探测机器人的智能无法在其实际工作场景中进行训练学习,一般只能依赖于地面模拟环境的离线训练。由于地面模拟环境也与真实环境存在较大差异,导致基于模拟训练得到的智能算法难以直接用于探测任务中,且未来的月球/行星表面任务过程复杂,存在大量未知的、不确定的工作场景,使得地面模拟更加困难。因此,未来的深空探测机器人智能学习方式将从现在的地面模拟环境的离线学习,向在线自主学习和依托虚拟现实技术的天地一体、虚实共融等相结合的多模式学习方式转变。

2.7 月球/行星基地及保障系统将通过复杂的集成组装过程构建

月球/行星基地及月球/行星表面保障系统,如能源系统、通信系统等,是月球/行星长期驻留科学探测和资源开采利用过程中所有星表活动的基础。月球/行星基地及月球/行星表面保障系统规模巨大,涉及部组件种类繁多,包含大型桁架展开机构、大面积柔性太阳能电池阵、长寿命高性能伺服机构、大型空间机械臂、空间智能探测器等部件与设施,机构组装集成过程复杂;同时,受到大型机构构型和星表建设形态等因素影响,组装时序和工艺流程也会对集成难度产生很大影响;不仅如此,部件和机构的集成需要在星表低重力/微重力、非结构环境等条件下完成,集成工作面临大型部件高精度装配、复杂形位检测、重力场下柔性体精度测量等复杂问题,使得模块或机构的集成组装难度更大。因此,月球/行星基地及保障系统的建造过程是一个复杂的组装集成过程,需要开展总体规划与设计。

2.8 表面探测活动将以分布式、并行化、分工协同的模式全面展开

未来,机器人和航天员长期驻留月球/行星表面,开展资源开发、科学研究和商业活动,在数十千米甚至数百千米范围内实现星表深度钻探与样品采集,对天体深层结构样品进行开采和分析;建立月球/行星基

天文台，扩展对宇宙的认识，开展宇宙引力波、射电脉冲星等研究。机器人作为活动主体，需要针对矿物开采、设施搭建、设备安装等不确定性任务的要求，以智能个体进行表面环境自主感知、任务自主学习和行为自主规划等操作，不同类型的机器人按照分工并行开展任务（如钻取、挖掘、运输、建造等），必要时同类机器人或者不同类型机器人协同完成复杂任务。如此大量的不同类型机器人构成智能群体，只有以分布式、并行化方式分工协同作业，才能使其能力远远大于单机器人能力的简单叠加，且群体中单个机器人结构进一步简化、体积更小、专业化程度更高，可大大提高机器人工作的可靠性，增加作业的灵活性，从而提高探测效率，完成单个机器人无法实现的任务。

3 深空探测人工智能主要关键技术

随着探测器、机器人自主能力的持续增强，使得

人类探索深空、认知深空和利用深空的能力不断得到提升，逐步衍生出许多新的探索发展思路；同时深空探测任务的持续推进为人工智能技术的发展与应用提供了极为广阔的舞台空间。未来深空探测任务中，环境的未知性、任务的复杂性、探测器的多样性、众多因素的不确定性和实施过程的高效性等，都是不断深化和逐步凸显的显著性特点，也是顺利推进探测进程必须考虑的重点和难点。而人工智能技术能够充分利用多学科融合、自主学习、人机结合和协同共融等理念，使得探测器和机器人具有极强的环境认知能力、自主规划能力、任务适应能力、异常处置能力和高效协同能力等，非常适合于在未来深空探测任务中大量应用。要形成这些能力，未来深空探测任务涉及的关键技术很多，但最为紧迫的关键技术主要有智能感知与信息融合技术、智能规划与决策控制技术等7个方面。其技术与需求和能力的对应关系如表1所示。

表 1 深空探测后续任务对人工智能关键技术的需求

Table 1 The key artificial intelligence technologies for the future deep space exploration mission

深空探测后续任务主要特点	对应的深空探测能力需求	对应的人工智能主要关键技术
多目标复杂飞行任务将转变为探测器智能为主、地面干预为辅的新模式	任务规划、决策与控制能力	智能规划与决策控制技术
精准着陆和大范围勘察是月球/行星驻留科学探测与资源开发利用的前提	任务规划、决策与控制能力	智能规划与决策控制技术
自主导航和感知能力	智能感知与信息融合技术	
星表基地建设与管理将成为月球/行星长期驻留的必然要求	居住和医疗服务能力	智能生存与健康管理技术智能装配与大规模建造技术
原位资源开采与利用是基地建设与管理长期驻留的必然选择	生产制造能力	智能开采与原位制造技术
功能各异的机器人将成为资源开采与基地建设任务的主体	移动、作业能力	智能机器人技术智能感知与信息融合技术
深空探测机器人智能化程度及学习模式亟需提升	学习能力	智能机器人技术
月球/行星基地及保障系统将通过复杂的集成组装过程构建	天地一体与虚实共融能力	智能虚拟现实技术
表面探测活动将以分布式、并行化、分工协同的模式全面展开	基建能力 任务规划、决策与控制能力	智能装配与大规模建造技术智能规划与决策控制技术

3.1 智能感知与信息融合技术

深空环境复杂、条件多变，具有很强的非结构化特性，且人类对其认知有限，使得探测过程存在极大的不确定性，同时受到天地远距离通信时延影响地面干预及时性差，需要针对作业任务要求研究智能感知与信息融合技术。由于月球/行星表面环境复杂，特别是类似月球背面这种崎岖不平、遍布坑坑洼洼的撞击坑区域，需要未来的表面作业机器人具备依赖于多源传感器的作业环境自主感知能力；为大范围精准探测星表/浅层水冰、矿藏等资源，也需要通过大能效比、高灵敏度、多功能、苛刻环境耐受度强的多类微传感器对月球/行星资源和分布特征进行自主识别与分类；同时，为执行星表各类复杂任务，需要多类智能机器

人自主协同工作，具备自主调整感知模式和感知策略的能力，不仅需要单个机器人自主感知，还需要多个机器人协同感知和多类传感信息的融合感知等。这些任务的实现都有赖于智能感知与信息融合技术。

智能感知与信息融合技术主要研究：①复杂非结构环境的适应性感知，基于多类传感器的环境感知、定位、自主导航和力学特性适应能力，确保机器人适应不同类型、松软度不同的非结构环境，能够安全运行于星球表面，避免发生沉陷、侧翻等危险；②探测过程的成长性感知，基于人工智能的自主识别与分类方法，包括岩石成分分析、资源定位、数据采集与分析等，能够辨别环境和资源特征，认知熟悉环境和同类或异类资源等；③面向不同任务的认知性感知，需

要机器人具备认知被感知环境和对象及任务特性的能力,自主调整多类传感器信息的组合感知策略和多类传感信息的融合利用方法等。

3.2 智能规划与决策控制技术

由于深空环境复杂多变、与地面通信延时大,地面无法全程实时掌握探测器运行状态,许多复杂任务过程(如多目标复杂飞行任务规划、精确着陆任务规划等)无法按照地面规划执行,需要探测器根据当前状态和目标任务做出实时的规划调整与决策,实现局部过程的自主控制;另一方面,以月球/行星表面探测为典型代表的深空探测任务中,许多任务需要多智能体协同高效实施,如果每个环节都由地面统一规划实施,会严重影响任务执行效率,必须依靠多类智能体的自主规划与决策及协同才能实现任务的高效执行,因此智能规划与决策控制是后续深空探测深入发展的必然要求。

智能规划与决策控制技术主要研究:①基于经验知识库的全局规划方法,综合考虑深空探测器飞行过程中需要满足的资源约束、时间约束、并发性约束、探测环境不确定及星上资源有限等约束因素,设计探测任务全过程大规模智能任务规划方法,形成全程认知知识库;②基于局部状态约束的智能规划与决策,研究基于局部状态信息的实时规划与决策控制策略调整方法,引入深度学习、强化学习等技术,设计复杂任务过程中可适应不同场景、不同环境、不同任务模式的智能规划和决策控制方法,特别是定点精准着陆和精准操作等任务;③多智能体协同任务的集群智能规划与控制技术,针对不同类型的复杂任务、不同功能的探测器,设计分布式的规划与控制算法,以完成复杂的决策与控制任务、解决任务复杂性问题。

3.3 智能机器人技术

未来深空探测任务中,在月球/行星表面进行长期驻留科学研究和资源开发与利用,资源勘查、矿产开采、原料运输和设施建造等众多任务需要依靠智能机器人完成,每个机器人具有很强的自主能力,不同机器人之间有明确的分工与协同关系,共同推进任务实施。随着人工智能技术在机器人上的深度应用,智能机器人不仅可以取代人去完成某些预定工作,也可以完成某些人所不能够完成的工作。智能机器人在深空探测中将显示其独到的优势,在星球基地建设和就位资源利用时,必须采用智能机器人进行自动化操作,特别是同时进行多项任务时,通过人机联合可以提高效率。智能机器人技术作为战略性关键技术,对未来月球基地建设和资源开发利用具有非常重要的意义。

受发射、运载、能量等资源,特别是空间环境条件的限制,空间机器人在设计和研制过程中在质量、体积、能耗、鲁棒性、可靠性等方面依然受到巨大的挑战。迫切需要开展的研究工作有:①空间环境适应技术,智能机器人本体需适应真空、失重(或不同的重力场)、大温度梯度、辐射、单粒子效应、原子氧、真空放电、表面静电积累、空间碎片等诸多空间环境的影响;②空间驱动与伺服技术,解决机器人在空间环境下高可靠运动、高精度运动、运动平稳性以及运动安全性等一系列问题;③自主作业与人机交互技术,机器人可以通过“人在回路”的方式完成特定的使命,同时在长延时、远程作业时还具有自主作业模式;④总体规划和顶层设计技术,确定总体方案,明确总体技术指标、系统的组成、总体构型需求、总体技术指标分析、各系统技术指标分析和相互接口关系等;⑤地面仿真与环境模拟技术,通过任务仿真、环境模拟、信息流和动作的模拟,以及故障模式和机器人运动特性的模拟,建立一套准确灵活、功能完备的地面测试仿真与模拟训练系统是确保机器人安全顺利完成任务、正确应对各种紧急情况与故障的重要手段。

3.4 智能开采与原位制造技术

月球/行星与地面距离远,将探测器和原材料从地面送往月球/行星表面耗费巨大,因此,必须最小化对地面运输补给的依赖性,研究利用星表已有资源进行原位开发、原位利用和原位制造。月球/行星表面基础设施体积和规模巨大,长期驻留、科学研究和资源开发与利用的经济价值也必须通过星表装备制造的产品与设施体现。首先利用智能机器人在月球/行星表面开采矿产资源,再结合以增材制造为代表的智能制造技术,定制化开发适合于星表设施建设的智能化基建平台。在设计研发制造系统的同时,应充分探索利用原位材料成型结构功能器件和原位建筑的工艺机理和材料制备工艺,形成以深空天体原位开发无人化、定制化、自动化、智能化为典型特征的原位制造技术体系。

智能开采和原位制造技术主要研究:①资源的智能发掘与开采技术,首先利用月球/行星表面的多光谱、多尺度图像数据,通过叠加分析筛选资源候选区,然后针对开采要求利用智能机器人以打钻、敲击、铲挖等方式实现对资源的开采与转运;②智能化制造技术,针对月球/行星表面特殊环境限制和土壤成分,着重研究基于粘接和烧结的智能增材制造技术,首选水冰资源丰富区域作为原位制造区,可采用快速膨胀粘接和三维喷涂粘结技术,降低成本和能耗,同

时在太阳能较为充足的区域，可采用基于机械臂为打印平台的月球/行星土壤复合材料电子束/激光烧结和高温熔覆等技术进行增材制造，此外，可以采用金属微滴数字化喷射3D打印技术直接熔化回收的金属块料，然后喷射均匀金属液滴，以实现金属零件3D打印成形，该过程不需要丝/粉状等特殊原材料，十分适合资源有限的深空探索活动。

3.5 智能装配与大规模建造技术

月球/行星基地及保障系统的建造，如长期驻留基地、太阳能电站等，需要利用原位资源制造的部件组装构建。由于月球/行星基地及月球/行星表面保障系统规模巨大，涉及部组件种类繁多，机构组装集成过程复杂且组装时序和工艺流程与工作环境密切相关，使得月球/行星表面的建造工作具有极高的不确定性，需要针对任务要求研究智能化装配与大规模建造技术。通常情况下，月球/行星基地及保障系统等大型设备设施的建造需要依赖于功能细分、相互协作的建筑机器人，面向月球/行星基地驻留设施以及机械装备的制造需求，利用原位资源制造的零部件，按照一定的工艺流程与建造要求，先组装形成小型组件、再组装形成中型设备、最终组装构建大型装备与系统，实现具备气密、防冲击、防辐射等功能的大规模基地驻留设施的智能建造。该过程中不仅需要考虑机器人的智能化协同，也要考虑零部件到组件、到设备、再到大型装备与系统全过程的建造顺序及深空环境的影响等因素，过程异常复杂且对个体与协同关系要求都很高，因此需要探索非结构化环境中的智能装配与大规模建造方法。

智能装配与大规模建造技术主要研究：①星表低重力/微重力、非结构环境等条件影响的高精度智能装配技术，考虑复杂形位检测、重力场下柔性体精度测量等因素的影响，基于智能感知与强化学习等技术，实现大型部件无人操作或人机协作的智能装配；②基于集群智能的协同装配技术，利用多类智能机器人的不同分工实现不同类型部件的组装，尤其是在组装过程中随着机构的逐步增大需要研究多个机器人协同完成多个复杂部件之间的组装问题；③大型装备与系统建造的并行化设计技术，大型装备的组装过程需要考虑工作环境和设备设施的结构特点，开展装配环节和流程的并行化设计，确保组装过程的稳定性，同时还要考虑不同类型组装的特殊性，设计多机器协同组装模式与组装方法等。

3.6 智能生存与健康管理系统

月球及以远行星距离远、环境条件恶劣，机器设

备和航天员的生存健康，仅仅依靠地面诊断、干预与引导的模式，存在较大弊端且难以应对许多危急情况，因此需要研究发展智能生存与健康管理系统，使得星球表面设备与设施能够自主检测、分析环境和健康的状况，建立一定的自主修复能力。未来的有人长期驻守的月球/行星基地中，需要保障航天员的人身安全与健康状况，同时也要具备设施自我检测与诊断及修复能力，一方面以航天员为中心，围绕航天员的安全工作、安全探测等需求设计智能航天服、体征监测和健康诊断装置与设施等，对航天员的行为与健康状态进行监测与管理；另一方面配备星表设备、航天器与机器人的智能监测与健康管理系统，使其具备一定的自主监测与管理能力，能够预测和判断自身的故障状态，及时实现能源补给与维修，确保基地设施能够长期稳定运行。

智能生存与健康管理系统主要研究：①栖息环境监控技术，基于人工智能技术实现栖息地环境的适宜度评估及抗菌、防火、绿色太空藻类生物净化、防泄漏等环境监测与控制等；②低重力下的人体医学检测处置智能技术，具备特殊疾病的智能检测、紧急病情的智能医疗救治等功能，主要包括暴露于微重力环境下产生的生理变化及其机制、宇宙辐射对健康的危害、幽闭等特殊环境产生的心理影响等；③轻质化、智能化舱外航天服技术，用于支撑航天员在星表行走和应用，其中航天服具有柔性电子智能体征监测、智能防尘、智能导航等功能；④智能健康评估与故障诊断技术，低重力/微重力、真空、高污染、大温差等复杂环境下深空探测器、基地设施与装置及机器人的智能健康状态评估和智能故障诊断技术等。

3.7 智能虚拟现实技术

由于深空环境的特殊性，以及深空环境中探测器/机器人作业过程的复杂性、不确定性与未知性等因素影响，一般无法提前预知或在真实物理世界中进行精确模拟。虚拟现实技术以计算机为基础，融合信号处理、动画技术、智能推理、预测、仿真和多媒体技术为一体，能够在虚拟的世界中逼真模拟复杂、多变的深空环境和探测器/机器人作业过程，是将探测器/机器人和人类深度关联的中间层级，是天地交互的媒介和桥梁，是实现天地一体、虚实共融的有力支撑。目前的虚拟现实技术一般针对确定性场景，其智能化程度较低，因此面对深空任务距离远、环境差、操作复杂和场景不确定或无法预知等特点，亟需发展具备更高智能的虚拟现实技术。

智能虚拟现实技术主要研究：①虚拟场景的智能

构建技术,根据探测器探测、感知并返回地面的信息,智能提取反馈有效信息,基于虚拟现实技术,实现融合月球/行星表面几何与物理特性的虚拟场景的智能构建;②基于虚拟场景的高置信度人工智能训练技术,通过在地面条件下建立基于虚拟/混合现实的复杂操作学习训练系统,实现月球/行星作业机器人的适应性学习与技能提升;③数字孪生技术,在虚拟环境中建立运行于空间环境的探测器/机器人等真实物体的数字孪生体,当真实物体运行、移动时,其对应的数字孪生体也将发生相同的动作状态;操作人员在虚拟环境中控制数字体运行时,对应的真实物体也收到相同的控制指令,实现虚实一致的运行过程。在深空探测任务中,应用数字孪生技术可以使地面人员全面直观地了解探测器、深空机器人等自身运行状态,方便及时做出任务部署和调整,可以实现以虚控实、虚实融合的天地一体控制。

4 结束语

近年来,人工智能技术取得了快速发展,并在深空探测领域智能化体系的构建与智能技术的应用中获得广泛重视。未来月球及其以远深空探测活动,由于任务的复杂性、模式的多样性和环境的特殊性,对人工智能技术提出了极为迫切的需求。可以预见,未来深空探测将呈现天地一体、虚实共融、人机协同的高度智能化图景。

目前,深空探测领域人工智能技术的发展总体上尚处于起步阶段,其未来发展与应用任重道远,我国应加快构建深空探测人工智能技术路线图和研究体系,早谋划、早部署、早研究,着力突破其关键技术,集小成为大成,加快推进深空探测模式的转变和地外深空天体资源开发利用能力的提升。

参 考 文 献

- [1] 吴伟仁,于登云.深空探测发展与未来关键技术[J].深空探测学报,2014,1(1):5-17.
WU W R, YU D Y. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.
- [2] 叶培建,邹乐洋,王大铁,等.中国深空探测领域发展及展望[J].国际太空,2018,478(10):6-12.
YE P J, ZOU L Y, WANG D T, et al. Development and prospect of Chinese deep space exploration[J]. Space International, 2018, 478(10): 6-12.
- [3] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等.“嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J].深空探测学报,2017,4(2):111-117.
WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.
- [4] 张嘉毅. NASA发布《国家太空探索活动报告》[J]. 科技中国, 2018(11): 102-102.
ZHANG J Y. NASA released the national report on space exploration activities[J]. Science and Technology of China, 2018(11): 102-102.
- [5] 王霄,吴润生.俄罗斯载人登月发展现状及趋势[J].国际太空,2018,479(11):46-51.
WANG X, WU R S. Status and trend of Russian manned Moon landing[J]. Space International, 2018, 479(11): 46-51.
- [6] 纪汉霖,黄嘉冬.我国人工智能产业发展及应用研究[J].软件导刊,2019,18(3):40-44.
JI H L, HUANG J D. The development and application of artificial intelligence industry in China[J]. Software Guide, 2019, 18(3): 40-44.
- [7] 郭延宁,冯振,马广富,等.行星车视觉导航与自主控制进展与展望[J].宇航学报,2018,39(11):1185-1196.
GUO Y N, FENG Z, MA G F, et al. Advances and trends in visual navigation and autonomous control of a planetary rover[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(11): 1185-1196.
- [8] 崔平远,徐瑞,朱圣英,等.深空探测器自主技术发展现状与趋势[J].航空学报,2014,35(1):13-28.
CUI P Y, XU R, ZHU S Y, et al. State of the art and development trends of on-board autonomy technology for deep space explorer[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 13-28.
- [9] 程翔.人工智能在航天领域中的应用[J].系统工程与电子技术,1989(3):1-9.
CHENG X. Applications of artificial intelligence to aerospace[J]. Systems Engineering and Electronics, 1989(3): 1-9.
- [10] 徐振耀.人工智能在航空航天领域中的应用[J].系统工程与电子技术,1993(3):49-53.
XU Z Y. Applications of AI to aerospace[J]. Systems Engineering and Electronics, 1993(3): 49-53.
- [11] 郭凤英,何洪庆.人工智能技术在航天领域的应用[J].中国航天,1996(6):19-21.
GUO F Y, HE H Q. Applications of AI technology to aerospace[J]. Aerospace China, 1996(6): 19-21.
- [12] 闫旭.人工智能在航天领域中的应用探讨[J].数字通信世界,2019(4):221.
YAN X. Discussion on the application of artificial intelligence in aerospace[J]. Digital Communication World, 2019(4): 221.
- [13] 杨维垣,张培志.航天专家系统需求、现状、特点和发展战略的初步研究[J].航天器工程,1993(1):11-19.
YANG W H, ZHANG P Z. A preliminary study on the requirements, current situation, characteristics and development strategy of space expert system[J]. Spacecraft Engineering, 1993(1): 11-19.
- [14] JPL. NASA/JPL Mars pathfinder[EB/OL].[2019-09-16].
<http://marsprogram.jpl.nasa.gov/MPF/>.
- [15] JPL. NASA/JPL Mars exploration rover mission[EB/OL].[2019-09-16].
<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/home/index.html>.
- [16] HELMICK D, ANGELOVA A, MATTHIES L. Terrain adaptive navigation for planetary rovers[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(4): 391-410.
- [17] WRIGHT J, HARTMAN F, COOPER B, et al. Driving on Mars with RSVPI[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(2): 37-45.
- [18] SQUYRES S W, KNOLL A H, ARVIDSON R E, et al. Exploration of

- victoria crater by the Mars rover opportunity[J]. *Science*, 2009, 324: 1058-1061.
- [19] SQUYRES S W, ARVIDSON R E, BELL J F, et al. The Spirit rover's Athena science investigation at Gusev Crater, Mars[J]. *Science*, 2004, 305: 794-799.
- [20] OJEDA L, BORENSTEIN J, WITUS G, et al. Terrain characterization and classification with a mobile robot[J]. *Journal of Field Robotics*, 2006, 23(2): 103-122.
- [21] ANGELOVA A, MATTHIES L, HELMICK D, et al. Learning and prediction of slip from visual information[J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24(3): 205-231.
- [22] BROOKS C A, IAGNEMMA K. Self - supervised terrain classification for planetary surface exploration rovers[J]. *Journal of Field Robotics*, 2012, 29(3): 445-468.
- [23] THOMPSON D R, CABROL N A. Fast onboard texture analysis for planetary exploration[C]//IJCAI Workshop on Artificial Intelligence in Space.[S. l.]: IJCAI, 2009.
- [24] WAGSTAFF K L, THOMPSON D R, ABBEY W, et al. Smart, texture - sensitive instrument classification for in situ rock and layer analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(16): 4188-4193.
- [25] THOMPSON D R, ALLWOOD A C, BEKKER D L, et al. TextureCam: autonomous image analysis for astrobiology survey[C]//Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, Texas: [s. n.], 2012.
- [26] HAYDEN D S, CHIEN S, THOMPSON D R, et al. Using clustering and metric learning to improve science return of remote sensed imagery[J]. *Acm Transactions on Intelligent Systems & Technology*, 2012, 3(3): 1-19.
- [27] CHIEN S, RABIDEAU G, TRAN D, et al. Activity-based scheduling of science campaigns for the rosetta orbiter[C]// International Conference on Artificial Intelligence. [S. l.]: AAAI Press, 2015.
- [28] JPL. NASA Mars rover can choose laser targets on its own[EB/OL].[2019-09-16]. <https://mars.jpl.nasa.gov/news/1925/nasa-mars-rover-can-choose-laser-targets-on-its-own/>.
- [29] JPL. Mars Science Laboratory-Curiosity: NASA's next Mars rover[EB/OL].[2019-09-16]. http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/.
- [30] SUN Z Z, JIA Y, ZHANG H. Technological advancements and promotion roles of Chang'e-3 lunar probe mission[J]. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 2702-2708.
- [31] ONO M, FUCHS T J, STEFFY A, et al. Risk-aware planetary rover operation: autonomous terrain classification and path planning[C]//2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2015: 1-10.
- [32] ROTHROCK B, KENNEDY R, CUNNINGHAM C, et al. Spoc: deep learning-based terrain classification for mars rover missions[C]//AIAA SPACE 2016. [S. l.]: AIAA, 2016: 5539.
- [33] GAUDET B, FURFARO R. Robust spacecraft hovering near small bodies in environments with unknown dynamics using reinforcement learning[C]// AIAA/AAS, Astrodynamics Specialist Conference.[S. l.]: AIAA, 2013.
- [34] GAUDET B, FURFARO R. Adaptive pinpoint and fuel efficient mars landing using reinforcement learning[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2014, 1(4): 397-411.
- [35] FURFARO R, WIBBEN D R, GAUDET R, et al. Terminal multiple surface sliding guidance for planetary landing: development, tuning and optimization via reinforcement learning[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2015, 62(1): 73-99.
- [36] FURFARO R, LINARES R. Waypoint-Based generalized ZEM/ZEV feedback guidance for planetary landing via a reinforcement learning approach[C]//3rd International Academy of Astronautics Conference on Dynamics and Control of Space Systems. Moscow, Russian Federation: [s. n.], 2017.
- [37] DING L, GAO H B, DENG Z Q, et al. Three-layer intelligence of planetary exploration wheeled mobile robots: Robint, virtint, and humint[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 58(8): 1299-1317.
- [38] CAMPBELL T, FURFARO R, LINARES R. A deep learning approach for optical autonomous planetary relative terrain navigation[C]//27th AAS/AIAA Spaceflight Mechanics Meeting. San Antonio, Texas: [s. n.], 2017.
- [39] FURFARO R, BLOISE I, ORLANDELLI M, et al. Deep learning for autonomous lunar landing[C]// AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. Snowbird, UT: AIAA, 2018.
- [40] WILKINSON M C, MEADE A J. Neural-network-inspired machine learning for autonomous lunar targeting[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2015, 11(7): 458-466.
- [41] BOUKERCHA A, AL-TAMEEMI A, GRUMPE A, et al. Automatic crater recognition using machine learning with different features and their combination[C]// Lunar & Planetary Science Conference. [S. l.]: Lunar and Planetary Science Conference, 2014.
- [42] HECKE K V, DE CROON G C H E, HENNES D, et al. Self-supervised learning as an enabling technology for future space exploration robots: ISS experiments on monocular distance learning[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 1-9.
- [43] IZZO D, WEISS N, SEIDL T. Constant-optic-flow lunar landing: optimality and guidance[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2012, 34(5): 1383-1395.
- [44] SÁNCHEZ-SÁNCHEZ C, DARIO I. Real-time optimal control via deep neural networks: study on landing problems[J]. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2016, 41(3): 1-14.
- [45] IZZO D, SPRAGUE C, TAILOR D. Machine learning and evolutionary techniques in interplanetary trajectory design[M]. Germany: Springer, 2019.
- [46] IZZO D, MÁRTENS M, PAN B. A survey on artificial intelligence trends in spacecraft guidance dynamics and control[J]. *Astrodynamics*, 2019, 3(4): 287-299.
- [47] ZHANG P, LIU X, ZHAO B, et al. Asteroid landing via onboard optimal guidance based on bidirectional extreme learning machine[C]// International Joint Conference on Neural Networks. [S. l.]: IEEE, 2016.
- [48] CHENG L, WANG Z, JIANG F, et al. Real-time optimal control for spacecraft orbit transfer via multi-scale deep neural networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. [S. l.]: IEEE, 2019.
- [49] SHANG H, WU X, QIAO D, et al. Parameter estimation for optimal asteroid transfer trajectories using supervised machine learning[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 79: 570-579.
- [50] 俞一鹏. 脑机融合的混合智能系统: 原型及行为学验证研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- YU Y P. Cyborg intelligent systems based on brain-machine integration: research on prototypes and behavioral verification[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

- [51] 赵海亮. 融合人机协同的月球车路径规划[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
ZHAO H L. The research of lunar rover path planning with human-machine collaborative[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [52] 吴伟仁, 于登云, 黄江川, 等. 太阳系边际探测研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(1): 6-21.
WU W R, YU D Y, HUANG J C, et al. Exploring the Solar system boundary[J]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2019, 49(1): 6-21.
- [53] FREITAS R A, HEALY T J, LONG J E. Advanced automation for space missions[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1982, 1(1): 1-11.
- [54] VOOSSEN P. NASA to pay private space companies for moon rides[J]. Science, 2018, 262(6417): 875-876.
- [55] National space exploration campaign report[EB/OL]. [2019-09-16]. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nationalspaceexplorationcampaign.pdf>.
- [56] What is Artemis? [EB/OL]. [2019-09-16]. <https://www.nasa.gov/feature/what-is-artemis/>.
- [57] 周生东, 王永生. 俄罗斯联邦2016-2025年航天计划基本内容[J]. 国际太空, 2017(5): 14-18.
ZHOU S D, WANG Y S. Basic content of Russia federation space program 2016-2025[J]. Space International, 2017(5): 14-18.
- [58] 俄罗斯: 执行载人登月任务, 着手建造月球基地[EB/OL]. [2019-09-16]. http://news.cnr.cn/gjxw/gnews/20190307/t20190307_524533372.shtml?from=groupmessage.
- [59] 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 78-85.
YUAN Y, ZHAO C, HU Z Y. Prospect of lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 78-85.

作者简介:

于登云(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国航天科技集团有限公

司科技委副主任, 中国探月工程副总设计师, 主要研究方向: 航天器系统工程、动力学与控制技术。

通讯地址: 北京市海淀区阜成路16号航天科技大厦(100048)

E-mail: yudyun@sina.com

张哲(1979-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 深空探测工程总体与航天测控通信技术。**本文通讯作者。**

通讯地址: 北京市海淀区知春路65号院1号楼中国卫星通信大厦B座(100190)

E-mail: cnclepzz@126.com

泮斌峰(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 航天飞行动力学与自主智能技术。

通讯地址: 陕西省西安市友谊西路127号251信箱(710072)

E-mail: panbinfeng@nwpu.edu.cn

刘传凯(1983-), 男, 助理研究员, 主要研究方向: 空间遥操作、智能信息处理、视觉导航。

通讯地址: 北京市海淀区北清路26号院(100094)

E-mail: ckliu2005@126.com

丁亮(1980-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 星球探测机器人, 野外足式机器人, 智能控制与视觉感知, 力学建模与仿真。

朱继宏(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 飞行器结构设计与太空原位制造。

通讯地址: 陕西省西安市友谊西路127号(710072)

E-mail: jh.zhu@nwpu.edu.cn

高海波(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 轮式星球车移动技术, 野外环境重载足式移动技术, 宇航空间机构微低重力模拟技术。

刘金国(1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 空间机器人, 无人自主平台, 仿生机器人。

通讯地址: 辽宁省沈阳市南塔街114号(110016)

E-mail: liujinguo@sina.cn

陈鹏(1986-), 男, 工程师, 主要研究方向: 信号与信息处理, 惯性导航。

Development and Trend of Artificial Intelligent in Deep Space Exploration

YU Dengyun¹, ZHANG Zhe², PAN Binfeng³, LIU Chuankai⁴, DING Liang⁵, ZHU Jihong³,
GAO Haibo⁵, LIU Jinguo⁶, CHEN Peng⁷

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

2. Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China;

3. School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China;

5. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

6. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

7. Shanghai Academy of Spaceflight Technology Beijing R&D Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Due to the long distance between the earth and the planetary and the extreme environment, artificial intelligence technology will be the focus in the future deep space exploration mission, particularly for the task of the lunar/planetary residence and the exploitation and utilization of planetary resources. Based on the retrospection of the development of the applications of artificial intelligence in deep space missions, several key technology fields for future artificial intelligence technology in deep space exploration activities are proposed.

Keywords: deep space exploration; planetary residence and resource exploitation; artificial intelligence; robot

Highlights:

- The development and trend of the applications of artificial intelligence in deep space missions are summarized.
- The main characteristics of artificial intelligence technology for deep space exploration are analyzed.
- Several key technology fields to be developed are proposed.

[责任编辑：宋宏，英文审校：朱恬]